

09;10

## **Синфазные наносекундные релятивистские СВЧ-генераторы обратной волны диапазона 37 GHz без электродинамической связи**

© М.И. Яландин, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов,  
К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, В.В. Ростов, И.В. Романченко,  
А.А. Ельчанинов, А.И. Климов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: rostov@ife.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2012 г.

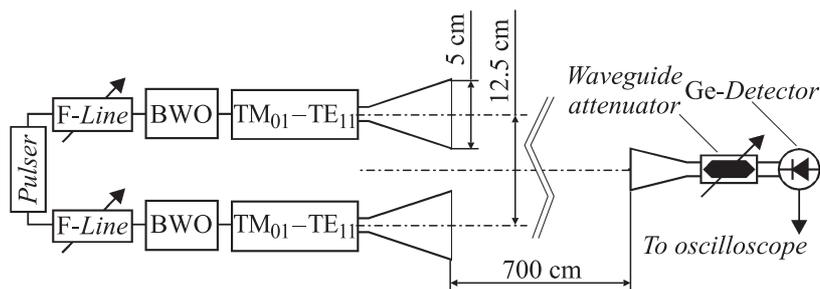
Исследована возможность синфазного возбуждения двух независимых наносекундных релятивистских СВЧ-генераторов обратной волны диапазона 37 GHz с сильноточными электронными пучками. Для этого применяется включение высоковольтных генераторов с пикосекундной точностью. Показано, что длительное — до 100–200 периодов поля — удержание фазы в каждом канале стабильно воспроизводится от импульса к импульсу и позволяет обеспечить когерентное суммирование волновых пучков мультимегаваттной мощности.

В работе исследуется задача повышения энергетики сильноточных релятивистских СВЧ-источников: из пиковой мощности, длительности импульса и направленности диаграммы излучения. В данной области за последние 10–15 лет достигнут значительный прогресс: это генерация микроволн в режиме сверхизлучения [1–4], пассивная компрессия частотно-модулированного СВЧ-импульса [5], активная компрессия короткого СВЧ-импульса в режиме нелинейного усиления [6,7]. Нестационарные сверхизлучательные генераторы [3,4] уже показали уникальные параметры на частотах повторения до единиц килогерц [8,9], доступных для современных сильноточных ускорителей [10–13], и при высоком уровне амплитудной и фазовой стабильности коротких импульсов излучения [14–16]. Так, нами был проведен эксперимент [17], где СВЧ-импульсы диапазона 10 GHz в двух идентичных сверхизлучательных ре-

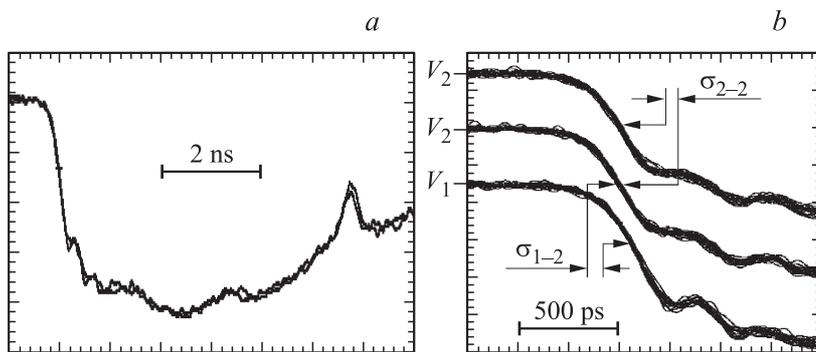
лятивистских лампах обратной волны (ЛОВ) без электродинамической связи возбуждались с нестабильностью разности фаз СВЧ-колебаний, составляющей  $\leq 2\%$  по отношению к периоду высокочастотного заполнения  $T_m = 100$  ps. Здесь и далее по тексту под нестабильностью или разбросом физической величины будет пониматься ее стандартное отклонение. Отношение длительности импульса к периоду СВЧ составляло  $(\tau_m/T_m) \approx 20$ . Данному результату предшествовали измерения временной нестабильности  $\sigma_f$  относительного запаздывания фронтов токов двух сильноточных электронных пучков со взрывоэмиссионных графитовых катодов, на которые подавался расщепленный ускоряющий импульс [18]. Было показано, что  $\sigma_f$  составляет единицы пикосекунд даже без принятия специальных мер для стабилизации амплитуды напряжения.

Представлялось важным проверить достижимость эффекта фазовой стабилизации двухканального СВЧ-генератора в диапазоне 37 GHz ( $T_m = 27$  ps), где требования к  $\sigma_f$  фронтов тока пучков более жесткие, и при относительно большей длительности импульсов. В [17,18] было высказано предположение, что ключевым фактором фазовой стабилизации возбуждения ЛОВ должно быть достаточное обострение фронта тока электронного пучка, ответственного за формирование начального СВЧ-сигнала. Другим важнейшим условием здесь является применение сильного продольного магнитного поля, при котором возможна равномерная инжекция электронов с кромки трубчатого катода [19,20] в режиме взрывной электронной эмиссии с относительно малой задержкой. И наконец, в случае двух каналов, должны быть выполнены условия их идентичности, включая требование малого различия в амплитуде и форме импульсов напряжения (порядка 1% и лучше в области нарастания напряжения).

Если в экспериментах [17,18] использовалось расщепление высоковольтного импульса от одного генератора, то в данной работе применялись два синхронизованных генератора РАДАН-303 [11] (рис. 1). Их накопители энергии на основе двойных формирующих линий (ДФЛ) заряжались параллельно, а разряжались каждый на свою нагрузку независимо. Для стабилизации напряжения пробоя объединенного разрядника [21] применялся тригатронный запуск высоковольтным импульсом с нестабильностью по времени порядка 10 ns. При микросекундном времени зарядки ДФЛ такой разброс трансформировался в нестабильность амплитуды ускоряющих импульсов (рис. 2, а) не



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки — двухканального мультимегаваттного СВЧ-генератора диапазона 37 GHz на основе релятивистских ламп обратной волны (BWO). Обозначения: F-Line — ферритовые передающие линии с подмагничиванием;  $TM_{01}-TE_{11}$  — преобразователи типа волны.



**Рис. 2.** *a* — импульсы ускоряющего напряжения с амплитудой — 165 kV в двух каналах экспериментальной установки, регистрируемые емкостными датчиками в передающих линиях с волновым сопротивлением 45  $\Omega$ ; *b* — к методике измерения нестабильности времен прихода фронтов ускоряющих импульсов напряжения ( $V_1$  и  $V_2$ ), формируемых в параллельных каналах. Пояснения — по тексту.

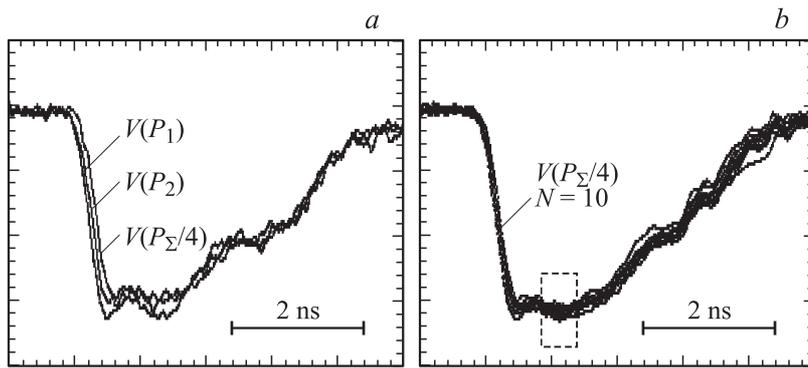
хуже  $\sim 1\%$ . Таким образом, по нестабильности амплитуды выбранная схема не уступала по своим возможностям схемам с расщеплением импульса напряжения. Однако в отличие от [17] в схеме из двух ДФЛ с объединенным разрядником имелся неустраняемый начальный разброс разности времен прихода фронтов импульсов напряжения (рис. 2, *a*) к

взрывоэмиссионным катодом. Это связано с хаотической локализацией искры разрядника, так как направление пробоя в коаксиальном тракте между двумя ДФЛ было радиальным (рис. 34 в обзоре [21]). При типичном зазоре искрового промежутка 3–4 мм, даже при привязке пробоя к заостренному пусковому электроду, искра могла смещаться на доли миллиметра по направлению одного из каналов, что может быть критично при длине волны  $\lambda \approx 8$  мм. Данный факт приводил к трудно устранимому разбросу  $\Delta\sigma_s$  разности времен фронтов двух, казалось бы, идентичных ускоряющих импульсов напряжения. Мы оцениваем это значение в  $\Delta\sigma_s = \sqrt{\sigma_{1-2}^2 - \sigma_{2-2}^2} \approx 2.3-2.8$  ps (рис. 2, *b*).

Чтобы получить эту величину, измерялся разброс  $\sigma_{1-2}$  разности времен фронтов импульсов напряжения  $V_1$  и  $V_2$  в независимых каналах. Одновременно для учета „временного шума“ осциллографа контролировался разброс  $\sigma_{2-2}$  разности времен фронтов двух сигналов, получавшихся расщеплением импульса  $V_2$ . Понятно, что физически  $\sigma_{2-2}$  отсутствует.

Крутизна фронтов ускоряющего напряжения, формируемых в обоих каналах, могла плавно меняться методом подмагничивания ферритовых линий [22], установленных в передающих трактах (рис. 1). Однако подмагничивание ограничивалось режимом, когда высокочастотная модуляция после фронта [23] была не выражена. Для обеспечения идентичности условий обострения в каналах соленоиды подмагничивания подключались к стабилизированному источнику постоянного тока последовательно. Такая же мера применялась для питания обмоток импульсных соленоидов двух СВЧ-генераторов от общей конденсаторной батареи. Соленоиды обеспечивали поле  $\sim 5.5$  Т, т.е. выше условия циклотронного резонанса для используемых ЛОВ. Мощности излучения отдельных каналов отличались незначительно и составляли  $100 \pm 20$  MW [14,24].

Для регистрации огибающей мощности излучения германиевый детектор размещался на удалении 7 м от двухканальной антенной системы (рис. 1). Здесь происходит сложение полей линейно поляризованных волновых пучков с гауссовым распределением. Поскольку ширина распределения по радиусу значительно превосходит смещение осей, при синфазном суммировании полей двух источников с мощностями  $P_1 \approx P_2 = P$  (осциллограммы  $V(P_1)$  и  $V(P_2)$ , рис. 3, *a*) в максимуме интегральной диаграммы направленности (ДН) поток мощности на апертуре приемной антенны детектора будет квадратично увеличиваться до  $P_{\Sigma \max} = 4P$ . Это и наблюдается на осциллограмме  $V(P_{\Sigma})$ . Для



**Рис. 3.** *a* — импульсы напряжения  $V(P_1)$  и  $V(P_2)$  с германиевого детектора, регистрируемые при раздельном включении двух СВЧ-генераторов, и интерференционный сигнал  $V(P_\Sigma/4)$  от обоих источников, ослабленный по мощности в 4 раза волноводным аттенюатором; *b* — накопление десяти последовательных импульсов с детектора, регистрирующего интерференционный сигнал. Прямоугольником выделена область измерения разброса амплитуды мощности суммированного сигнала.

исключения фактора нелинейности детектора осциллограмма  $V(P_\Sigma)$  получена при ослаблении суммированного СВЧ-сигнала по мощности в 4 раза калиброванным волноводным аттенюатором, установленном в тракте детектора. Видно, что длительность суммированного СВЧ-импульса ( $\tau_m/T_m$ )  $\approx 150$  совпадает с длительностью генерации в отдельных каналах. В принципе, аналогичную картину можно получить из статистической выборки, при случайном совпадении фаз генерации двух ЛОВ. В наших же экспериментах когерентный характер суммирования доказывается воспроизводимостью картины интерференции полей от импульса к импульсу. Это представлено на рис. 3, *b*, где накоплено десять последовательных суммированных СВЧ-импульсов, также ослабленных аттенюатором в 4 раза. По главному направлению антенной системы при перестройке разности фаз излучателей наблюдался стабильный сигнал с мощностью в диапазоне  $[0, P_{\Sigma \max}]$ .

Максимум по главному направлению ДН в представленных экспериментах обеспечивался тонкой подстройкой задержки [22] одной из ферритовых линий параллельным шунтированием тока подмагничивающего соленоида ( $\sim 0.1$  ps/mA). При этом полному току в соленоидах 3.3 А соответствовало поле в зоне ферритового заполнения  $\sim 12$  kA/m, т. е.

имело место управляемое пространственное сканирование ДН. Мощность менялась от максимума до минимума при смещении фронта одного из ускоряющих импульсов на  $\sim 15$  ps. Данная величина близка к  $0.5T_m$ , и это означает, что взрывоэмиссионные процессы на катоде в сильном магнитном поле достаточно стабильны и малоинерционны. Как и на ускоряющем импульсе (рис. 2), на фронте импульса тока пучков ( $\sim 1.6$  kA) имеются ступенчатые участки, но с большей крутизной. По измерениям коллекторным датчиком [25] длительность перепада таких ступенек тока на входе в замедляющую структуру ЛОВ не превышала 200 ps. При дальнейшем движении пучка возможно дополнительное динамическое обострение фронта тока.

В отличие от методик [17] амплитудный разброс мощности максимального суммированного сигнала (рис. 3, *b*) может дать лишь упрощенную оценку нестабильности  $\sigma_{\delta\phi}$  разности фаз  $\delta\phi$  между каналами. Если принять, что при  $\delta\phi = 0$  достигается мощность  $P_{\Sigma \max} \approx 4P$  (что следует из рис. 3, *a*), тогда нижний предел снижения интегральной мощности  $P_{\Sigma \min} < 4P$  (это измерялось в квазиплоской части осциллограммы, выделенной рамкой на рис. 3, *b*) дает оценку максимального отклонения разности фаз  $\Delta\phi$ , причем в случае вариации ее знака. Это наиболее пессимистическое значение составляет  $\Delta\phi = \pm 3.5$  ps в пересчете на шкалу времени и возникает, судя по всему, из-за весьма значительной величины  $\Delta\sigma_s = 2.3-2.8$  ps. Сравнивая измеренные значения  $\Delta\phi$  и  $\Delta\sigma_s$  с достаточной уверенностью, можно предположить, что  $\sigma_{\delta\phi}$  вряд ли превышает 1 ps.

Таким образом, в эксперименте продемонстрирована возможность когерентного сложения мощностей излучения в диапазоне 37 GHz от двух каналов без электродинамической связи и при значительном ( $> 100$ ) количества периодов СВЧ-колебаний. Представленные исследования, в очередной раз подтверждая концепцию [17], показывают реальную перспективу для наращивания плотности потока мощности многоканальных СВЧ-источников типа антенных решеток с единичными модулями субгигаваттной мощности на основе взрывоэмиссионных пучков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты: 11-02-00097а, 11-08-00176а и 12-08-00476а. Исследования проводились по интеграционному проекту ИЭФ УРО РАН и ИСЭ СО РАН в соответствии с тематикой программы президиума РАН „Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники“.

Авторы признательны академикам Г.А. Месяцу и А.Г. Литваку за внимание к работе.

## Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 63. В. 5. С. 322–326.
- [2] Eltchaninov A.A. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. V. 32. N 3. P. 1093–1099.
- [3] Eltchaninov A.A. et al. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. P. 187–196.
- [4] Korovin S.D. et al. // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. N 1. P. 016501 (1)–(8).
- [5] Братман В.Л. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 2. С. 113–117.
- [6] Барышев В.Р. и др. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 1. С. 105–111.
- [7] Яландин М.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. В. 11. С. 620–625.
- [8] Гришин Д.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 19. С. 24–31.
- [9] Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 17. С. 23–32.
- [10] Korovin S.D. et al. // Proc. of the IEEE. 2004. V. 92. N 7. P. 1082–1095.
- [11] Mesyats G.A. et al. // Proc. of the IEEE. 2004. V. 92. N 7. P. 1166–1179.
- [12] Yalandin M.I. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2002. V. 30. N 5. P. 1700–1704.
- [13] Lyubutin S.K. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2005. V. 33. N 4. P. 1220–1225.
- [14] Ростов В.В. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 11. С. 85–92.
- [15] Афанасьев К.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 23–28.
- [16] Гришин Д.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 19. С. 14–20.
- [17] Ельчанинов А.А. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 1. С. 125–130.
- [18] Яландин М.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 17. С. 41–49.
- [19] Беломытцев С.Я. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 18. С. 1089–1092.
- [20] Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 19. С. 30–39.
- [21] Яландин М.И., Штак В.Г. // ПТЭ. 2001. В. 3. С. 5–31.
- [22] Бакит Р.Б. и др. // ПТЭ. 1968. В. 4. С. 124–126.
- [23] Романченко И.В., Ростов В.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 7. С. 111–114.
- [24] Yalandin M.I. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2010. V. 38. N 6. P. 1398–1402.
- [25] Yalandin M.I. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2010. V. 38. N 10. P. 2559–2564.